

Entwicklungslinien der optischen Multi-Terabit/s-Infrastruktur

Development Directions of Optical Multi-Terabit/s-Infrastructure

Dr. Kurt Lösch, Bell Labs Germany, Alcatel-Lucent, Stuttgart, Deutschland, Kurt.Loesch@alcatel-lucent.de

Kurzfassung

Der Datenverkehr im Internet wird in den nächsten Jahren weiterhin deutlich zunehmen, insbesondere wegen des stark steigenden Anteils von Videodaten. Dieser Betrag zeigt auf, wie die zukünftigen Metro- und Kernnetze diese ständig wachsende Kapazitätsnachfrage kostengünstig erfüllen können. Lösungsansätze sind die Erhöhung der Flexibilität durch dynamisch rekonfigurierbare optische Pfade, Netzknoten mit Datendurchsätzen von mehreren Tbit/s und Schnittstellen mit Datenraten im Bereich von 100 Gbit/s, optische Übertragung mit 100 Gbit/s pro Wellenlängenkanal gepaart mit einer hohen spektralen Effizienz sowie Protokolle für den Datentransport mit garantierter Dienstgüte und ein Netzwerk mit schichtenübergreifenden Steuerungs- und Managementverfahren.

Abstract

The internet traffic volume will continue to grow exponentially within the coming years mainly due to the growing share of video services. This paper will show how future metro and core networks can provide the necessary capacity increase in a cost efficient way. Envisaged solutions are the increase of network flexibility by dynamic path reconfiguration, network nodes with a data throughput of several Tbit/s and with interfaces operating at 100 Gbit/s, optical transmission at 100 Gbit/s per wavelength channel and with high spectral efficiency as well as protocols ensuring the required quality of service and a network structure with cross-layer control and management functions.

1 Ausgangslage und Trends

Das Wachstum des Internet-Verkehrsvolumens hat sich in den letzten Jahren ungebrochen fortgesetzt. Spitzenverkehlasten beim Internet Exchange in Amsterdam und im Deutschen Zentrum liegen derzeit oberhalb 400 Gbit/s. In Amsterdam betrug das Wachstum von 2002 bis 2007 im Mittel etwa 100% pro Jahr ([1], vgl. Bild 1).

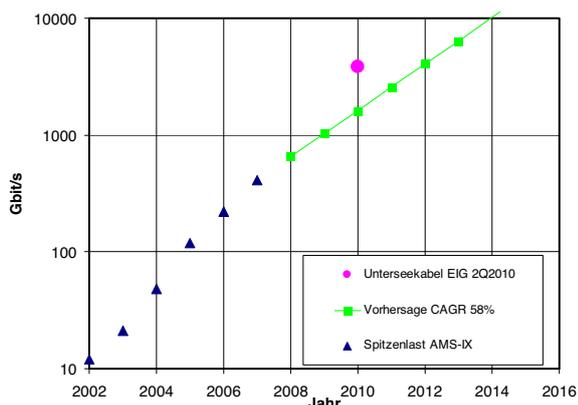


Bild 1 Wachstum des Internetverkehrs am Beispiel des Amsterdam Internet Exchange [1], Extrapolation nach Froberg [2, 3] und Kapazität des neuen Unterseekabels EIG von England nach Indien im Jahr der Fertigstellung

Für die folgenden Jahre gehen Experten von einem geringeren Wachstum von beispielsweise 58% (Linie in Bild 1) in Analogie zum Moore'schen Gesetz aus [2, 3]. In allen Vorhersagen wird die 1 Tbit/s-Grenze für einen großen Internetknotenpunkt in sehr naher Zukunft überschritten.

Dem trägt auch das in 2008 beauftragte Unterseekabel EIG (Europe India Gateway) von England nach Indien Rechnung, das im 2. Quartal 2010 in Betrieb gehen wird und für eine maximale Kapazität von 3,84 Tbit/s ausgelegt ist [4]. Allerdings sind die Endkunden kaum bereit, für höhere Bandbreite und Datenmengen entsprechend höhere Gebühren zu bezahlen, d.h. die Netzbetreiber stehen unter erheblichem Kostendruck, den diese an die Gerätehersteller weitergeben. Um die drastische Senkung der Kosten für das transportierte Bit (sowohl für Investition als auch für Betrieb) zu erreichen, sind für die Telekommunikationsinfrastruktur folgende Entwicklungen nötig:

- Vereinheitlichung der Netzinfrastruktur in Richtung Pakettransport auch für das Kernnetz (Ethernet)
- Erweiterung der Ethernet-Technik um Carrier Grade Eigenschaften, um die Anforderungen neuer Dienste wie z.B. Internet-TV und Videokonferenzen zu erfüllen
- Erhöhte Flexibilität in der Konfigurierbarkeit der Netze (z.B. Bandwidth on Demand)
- optische Übertragungsverfahren mit höchstmöglicher Datenrate pro Kanal und hoher spektraler Effizienz, um z.B. 100 Gbit/s in einem für 40 Gbit/s ausgelegten Kanalrastraster zu übertragen.

2 Evolution des Transport-Netzwerks

Seit einigen Jahren werden die existierenden verbindungsorientierten optischen Transportnetze (SDH/SONET) um Paketdienste und Ethernet Bridge Funktionen erweitert, um Pakettransport und private LAN-Dienste zu ermögli-

chen. Außerdem wurde die Bandbreitenzuordnung flexibilisiert. Im nächsten Schritt wurden paketorientierte Schaltfunktionen in die Schaltmatrizen des Kernnetzes eingeführt. Administration, Kontrolle und Management konnten weitgehend vom klassischen optischen Transportnetz übernommen werden, mussten jedoch um eine technologieabhängige und dynamische, von der Datenebene getrennte Steuerungsebene (Control Plane) ergänzt werden.

2.1 Vereinheitlichung der Netzstruktur

Für das Pakettransportnetz (Kernnetz), das die Netze für Sprachdienste und Daten zusammenführt, kommen zwei Paketformate in Frage: Ethernet als klassische Schicht 2-Technologie aus dem Bereich der Unternehmensnetze und MPLS (Multiprotocol Label Switching) aus dem Kernnetz. Beide Formate haben ihre Stärken und Schwächen und müssen gemäß den speziellen Anforderungen des Transportnetzes angepasst werden. Ethernet muss um Carrier Grade-Funktionalitäten (z.B. Quality of Service) erweitert werden. Lösungsansätze sind u.a. PBT (Provider Backbone Transport) und VLAN-XC (Virtual LAN Crossconnect). Aufbauend auf MPLS ermöglicht die Netztechnik Transport-MPLS (T-MPLS), Pakete unabhängig vom physikalischen Medium (OTH, SDH, Ethernet, PDH) zu transportieren und zu schalten, sowie die individuelle Dienstqualität sicherzustellen. Im Gegensatz zu PBT unterstützt T-MPLS neben Ethernet auch die „alten“ Transportverfahren (ATM, FR, SONET, SDH, MPLS) und vor allem Punkt-zu-Multipunkt-Verkehr, was für Verteildienste wie z.B. Videokonferenz/Internet-TV, sehr nützlich ist. Im Februar 2008 wurde von den Telekommunikations- und Internet-Standardisierungsgremien ITU und IETF eine übergreifende Arbeitsgruppe eingerichtet, die MPLS um ein Transportprofil erweitern soll (MPLS-TP), welches gute Akzeptanzchancen in der Industrie hat und in welches T-MPLS aufgeht [5]. Damit wird eine nahtlose Migration zum Next Generation Network (NGN) ermöglicht, das den weiter wachsenden Verkehr mit hoher und vor allem zu niedrigeren Kosten pro Bit transportiert.

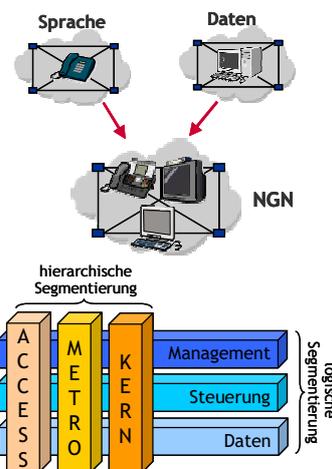


Bild 2 Konvergenz der Netze

Vorteilhaft für Anschaffung und Betrieb (Total Cost of Ownership) ist, dass dann Zugangs-, Metro- und Kernnetz eine einheitliche auf Ethernet beruhende Struktur aufweisen (siehe Bild 2 unten). Für das Kernnetz ist die Management-Ebene um neue Betriebs- und Administrationsfunktionalitäten (z.B. flexible und schnelle Rekonfiguration) zu erweitern, um Betriebskosten einzusparen. Die Steuerungsebene wird auf den de-facto Standard GMPLS (Generalized MPLS) aufbauen und um Schnittstellen zur Management- und Datenebene ergänzt werden, während für die Datenebene mehrere Optionen bestehen bleiben. Für alle drei Ebenen muss Interoperabilität über Betreiber-grenzen hinweg sichergestellt werden.

2.2 Schichtenübergreifende Steuerung

Um die erforderliche Kostenstruktur zu erreichen, wird sowohl bei PBT als auch bei MPLS-TP eine schichtenübergreifende Steuerung der Paketweiterleitung angedacht. Gemeinsames Prinzip ist, dass der Verkehr in der Schicht geschaltet wird, in der die Funktionalität (entsprechend der Bandbreitengranularität und Dienstgütevereinbarung) benötigt wird: Verkehr, der zum Beispiel nicht für den mittleren Knoten in Bild 3 bestimmt ist, wird wenn möglich im Durchgangspfad von Schicht 1 (optisch, d.h. auf Wellenlängengranularität) oder Schicht 2 weitergeleitet (bei großen Knoten sind dies typischerweise ca. 70% des eingehenden Verkehrs). Andernfalls erfolgt die Weiterleitung an die höheren Schichten 2 bzw. 3. Dies erfordert eine entsprechende Verpackung der Datenpakete in größere Container gemäß ihres Zieles und eine schichtenübergreifende Steuerungsfunktion. So kann sowohl der Durchsatz eines Knotens bis in den Multiterabit/s-Bereich gesteigert als auch der Energieverbrauch optimiert werden, da das Routing in Schicht 3 sehr energieintensiv ist [6].

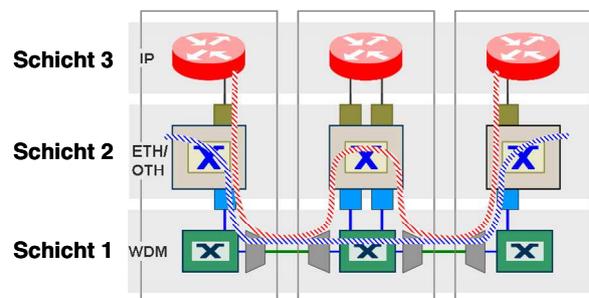


Bild 3 Schichtenübergreifende Knotensteuerung

2.3 Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit

Für kostengünstigen Betrieb ist es erforderlich, die optischen Pfade in Schicht 1 auf Wellenlängengrundlage dynamisch konfigurierbar zu machen, zum Beispiel um kurzfristig Bandbreite nach Bedarf bereitzustellen. Hierzu werden OXCs (Optical Crossconnect) und ROADMs (Reconfigurable Optical Add & Drop Multiplexer) eingesetzt. Beim OXC werden die ankommenden optischen Signale in einzelne Wellenlängenkanäle aufgetrennt, detektiert, regene-

riert, elektrisch geschaltet und dann wieder neu ausgesendet (die ausgesendete Wellenlänge muss dabei nicht der ankommenden entsprechen). Da die Signale vollständig regeneriert werden, können beliebig viele OXC kaskadiert werden. Bei den ROADMs dagegen findet keine Konversion statt, die Pfadwahl erfolgt auf rein optischem Weg. Beim Einsatz von ROADMs ist daher auf folgende Störeinflüsse zu achten, welche die Kaskadierbarkeit begrenzen: Die kaskadierten Wellenlängenfilter führen auch bei perfekter Mittenlage zu einer Einengung der spektralen Breite des optischen Signals (Bitfehler). Das Zuschalten einer neuen Wellenlänge auf eine bestehende Strecke mit optischen Verstärkern beeinflusst die Verstärkung der vorhandenen Wellenlängen und kann zu Leistungsspitzen führen. Darüber hinaus stellt die dynamische Konfiguration mittels ROADMs erhöhte Anforderungen an die Übertragungstechnik. Sie muss eine große Toleranz aufweisen gegenüber Leistungsschwankungen sowie Änderungen der chromatischen Dispersion und der Polarisationsmodendispersion bedingt durch unterschiedliche Streckenlänge und eventuell unterschiedliche Fasertypen pro Segment. Diese Störeinflüsse und Begrenzungen müssen beim Netz-Management und bei der schichtübergreifenden Netz-Steuerung automatisch berücksichtigt werden.

2.4 Optischer Transport

Die Weiterentwicklung der Router in Richtung Multiterabit/s-Durchsatz erfordert höhere Datenraten pro Port, um die Packungsdichte und den systeminternen Verbindungsaufwand in vernünftigen Dimensionen zu halten. IEEE standardisiert die Ende-zu-Ende-Übertragung von 100 G Ethernet (100GE) Datenströmen (100 Gbit/s am MAC-Interface) bis zu einer Streckenlänge von 40 km. Von der ITU-T Study Group 15 wurde für die Fernstrecke eine Datenrate von etwa 112 Gbit/s vorgeschlagen, in der sich die 100 Gbit/s Ethernet-Datenrate und zusätzlich OAM-Funktionen und Fehlerkorrektur unterbringen lassen. Im Folgenden wird vereinfachend in beiden Fällen von 100 Gbit/s gesprochen.

100GE wird als der nächste Schritt in der Abfolge der Ethernet-Datenraten 100BaseTx, 1000BaseSX, 10GE angesehen (Faktor 10 pro Generation), während beim bisherigen SDH-Netz die Entwicklung dem Faktor 4 folgte (625 Mb/s, 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s).

100 Gbit/s-Interfaces für kurze Strecken (10/40 km) können beispielsweise als 4 Wellenlängenkanäle mit je 25 Gbit/s Datenrate realisiert werden (Kanalabstand 5 nm). Die Laufzeiten der 4 Wellenlängen sind unterschiedlich und müssen im Empfänger elektronisch kompensiert werden (De-Skewing).

Für die Fernstrecken wird die Aufteilung von 100 Gbit/s auf N Wellenlängenkanäle nicht als praktikabel angesehen, da in diesem Fall auch N Eingänge bei optischen Add&Drop Multiplexern belegt würden und die N Wellenlängen auch stets gemeinsam geschaltet und über den selben optische Pfad gesendet werden müssten, um Laufzeitunterschied gering zu halten. Erschwerend kommt hinzu, dass 100 Gbit/s-Kanäle zusammen mit bereits vorhande-

nen 10 Gbit/s oder 40 Gbit/s-Kanälen auf einer Strecke mit einem Kanalaraster von 100 GHz oder sogar 50 GHz transportiert werden sollen. Das erfordert Modulationsverfahren mit einer hohen spektralen Effizienz.

2.4.1 Modulationsverfahren

Als Modulationsverfahren für optische Übertragung bei sehr hohen Datenraten kommen in Frage:

- Amplitudenumtastung (ASK, Amplitude Shift Keying) On-Off-Keying (OOK): (Non) Return to Zero, (N)RZ, Single Side Band (SSB), Vestigial SB
- Differentielle Phasenmodulation : NRZ- und RZ-DPSK (Diff. Phase Shift Keying) NRZ- und RZ-DQPSK (Diff. Quadrature PSK)
- höherstufige Modulation: n-QAM (Quadrature Amplitude Modulation)
- Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM)

Bild 4 zeigt die bei 100 Gbit/s derzeit untersuchten Modulationsverfahren, die erzielbare spektrale Effizienz und die zugehörigen Symbolraten.

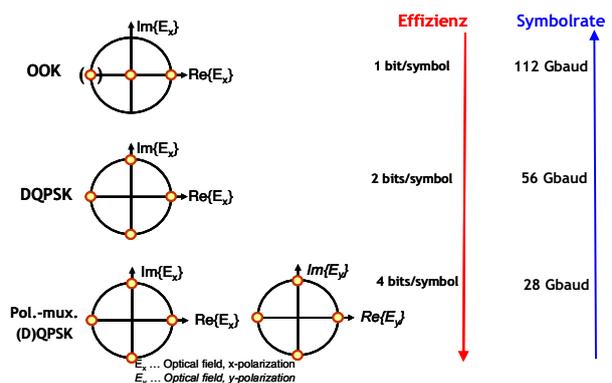


Bild 4 Modulationsverfahren und spektrale Effizienz; die Symbolraten beziehen sich auf eine Datenrate von 112 Gbit/s

Die Modulationsverfahren verhalten sich unterschiedlich gegenüber den begrenzenden Faktoren bei der Glasfaserübertragung. Die wichtigsten sind (vgl. **Bild 5**):

- *chromatische Dispersion* (CD, Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit); eine Standard Single Mode Faser (SSMF) mit $D=16,6$ ps/nm·km würde bei 100 Gbit/s nur eine Strecke von maximal ca. 1 km zulassen; durch spezielle Kompensationsfasern mit gegenläufiger Dispersion kann dieser Effekt weitestgehend kompensiert werden (für alle Wellenlängen auf einer Faser).
- *Polarisationsmodendispersion* (PMD, Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Polarisation des optische Signals); dieser Effekt variiert stochastisch und würde bei einer modernen Faser mit einem PMD-Wert von $0,1$ ps/ $\sqrt{\text{km}}$ eine maximale Streckenlänge von 100 km bei 100 Gbit/s erlauben. Zur Kompensation ist für jeden Wellenlängenkanal ein abstimmbarer optischer PMD-Kompensator erforderlich, der in eine

Regelschleife zur Optimierung der Augenöffnung eingebunden werden muss. Alternativ kann eine schnelle Variation der Polarisationsrichtung (Polarisation Scrambling) eingesetzt werden, die für alle Wellenlängen auf einer Faser gemeinsam wirkt [7,8].

- *Akkumulation des Rauschens der verstärkten spontanen Emission (ASE) in Erbium-dotierten Faserverstärkern*; wenn CD und PMD optimal kompensiert sind, legt dieser Effekt die Grenze für die Übertragungslänge auf 1000 km bei 100 Gbit/s und NRZ-Format fest. Beim DQPSK-Format liegt die Grenze bei etwa 2000 km (nicht in Bild 5 dargestellt).

Optimale Eigenschaften gegenüber diesen faserbedingten Störeinflüssen weist das Polarisationsmultiplex-DQPSK-Format mit kohärenter Detektion und elektronischer Signalverarbeitung auf. Es ermöglicht im Prinzip eine Streckenlänge von ca. 3000 km und man kann auch nahezu alle CD- und PMD-Effekte in der digitalen Signalverarbeitung herausrechnen.

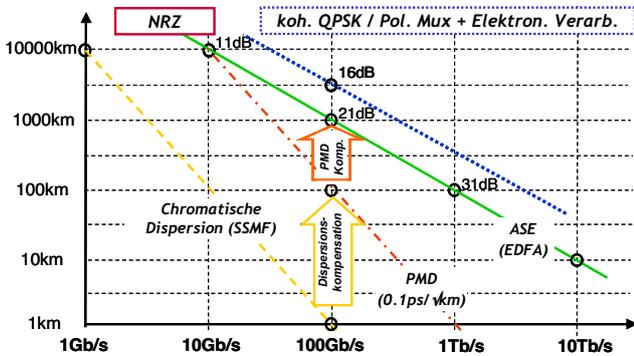


Bild 5 Grenzen der optischen Übertragung durch chromatische Dispersion (CD), Polarisationsmodendispersion (PMD), und verstärkte spontane Emission (ASE) in Faserverstärkern für NRZ-Modulation sowie für Polarisationsmultiplex QPSK mit kohärenter Detektion und elektronischer Signalverarbeitung.

2.4.2 Optische und elektronische Komponenten

Mit steigender spektraler Effizienz nimmt allerdings die Komplexität der Sender und Empfänger stark zu (vgl. **Bild 6**). OOK stellt die höchsten Anforderungen an die Bandbreite der Komponenten, aber Sender und Empfänger sind einfach aufgebaut. Kommerziell erhältliche LiNbO₃-Mach-Zehnder-Modulatoren haben heute eine 3dB-Bandbreite von ca. 35 GHz (was eigentlich noch nicht ausreicht) und benötigen recht hohe Ansteuerspannungen [9]. InP-basierte Lösungen sind hier prinzipiell günstiger, aber noch im Entwicklungsstadium. InP/InGAs-Photodioden in verschiedenen Ausführungen weisen ausreichend hohe 3dB-Bandbreiten von mehr als 100 GHz auf [10]. Erste hybridintegrierte Empfänger mit einer InP/InGAs-Photodiode, einem SiGe 1:2-Demultiplexer und einem SiGe-Taktverstärker erreichen eine 3dB-Bandbreite von 55 GHz [11]. Bei DQPSK wird im Sender ein Intensitäts(I)- und Phasen(Q)-Modulator bestehend aus 2 Mach-Zehnder-Modulatoren, einem 90°-Phasenschieber und zwei 3dB-Kopplern benötigt. Der Empfänger besteht aus 2

Delay Line Interferometern (DLI) mit nachgeschalteten Photodiodenpaaren und 2 Differenzverstärkern. Bei Polarisationsmultiplex-DQPSK (in Bild 6 nicht dargestellt) verdoppelt sich der Komponentenaufwand nochmals auf Sender- und Empfangseite. Zusätzlich sind noch Polarisationsmultiplexer (PBS, Polarisation Beam Splitter) erforderlich. Der praktische Einsatz solcher Modulationsverfahren erfordert die weitgehende monolithische Integration der optischen Komponenten.

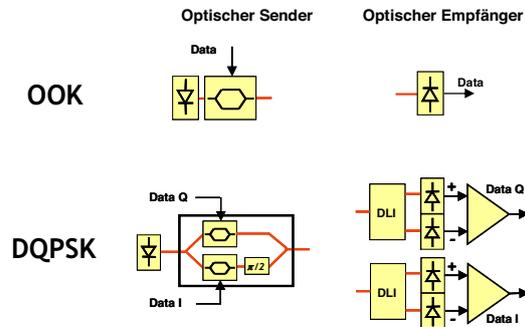


Bild 6 Prinzipaufbau von Sender und Empfänger für On-Off-Keying (OOK) und Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)

Bei kohärenter Detektion ist noch eine aufwändige elektronische Signalverarbeitung der 4 Ausgangssignale nachzuschalten. Für 112 Gbit/s benötigt man Analog-Digitalkonverter mit einer Abtastrate von 28 GHz und mindestens 4 bit Auflösung und einen Prozessor der 4 dieser Signale verarbeitet. Der Gesamtdurchsatz beträgt also 448 Gbit/s. Bis solche Schaltkreise verfügbar sind, werden im Labor die Signale in einem Samplingszillograph abgespeichert und off-line ausgewertet.

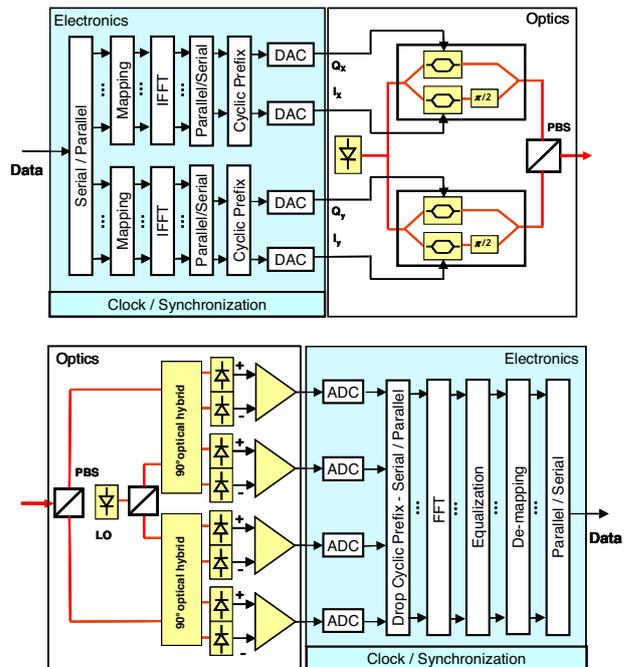


Bild 7 Prinzipaufbau von Sender (oben) und Empfänger (unten) für Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM)

Das Orthogonale Frequenz-Multiplex-Verfahren (OFDM) bietet als digitale Mehrträger-technik im Prinzip erhebliche Vorteile. Über die Toleranz der kohärenten Detektion gegenüber chromatischer Dispersion und PMD hinaus können damit wesentlich leichter und flexibler höherstufige Modulationsverfahren, wie z.B. 8-QAM, realisiert werden. **Bild 7** zeigt die Funktionsblöcke von Sender und Empfänger. Während die optischen Funktionsblöcke weitgehend denen bei Pol.-Mux-DQPSK entsprechen, sind sehr aufwändige elektronische Signalverarbeitungsschritte nötig, Seriell-Parallel-Wandlung, (Inverse) Fouriertransformation, Mapping, Prefix-Erzeugung bzw. Entfernung und Digital-Analog-Wandlung durchzuführen. Die Entwicklung dieser Schaltung für 100 Gbit/s dauert noch an.

2.4.3 Übertragungsexperimente

Datenraten von mehr als 100 Gbit/s pro Wellenlängenkanal stellen für die Übertragung auf Glasfasern kein prinzipielles Problem dar, wenn die Dispersion sorgfältig kompensiert wird. So wurden zum Beispiel 320 Gbit/s durch optisches Zeitmultiplexen (OTDM) erzeugt und über 80 km übertragen [12]. Für Produkte ist jedoch die optische Zeitmultiplex-technik auf absehbare Zeit nicht geeignet.

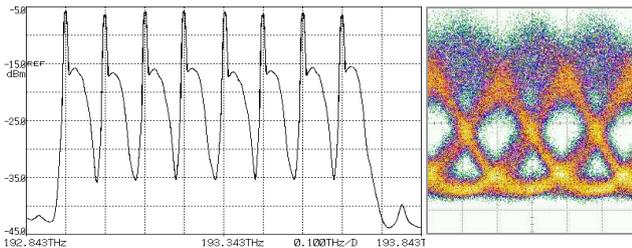


Bild 8 Spektrum der 107 Gbit/s-Kanäle mit 100 GHz Kanalabstand nach Vestigial Side Band-Filterung und Augendiagramm eines Kanals [13].

Im folgenden Abschnitt werden Übertragungsexperimente zu 100/107/112 Gbit/s sortiert nach dem Modulationsverfahren kurz beschrieben:

Um die optische Bandbreite bei OOK-Modulation einzuzengen (und die spektrale Effizienz zu erhöhen), bietet sich Einseitenbandübertragung an. Hierzu gehört das Vestigial Side Band-Verfahren, bei dem das optische Signal nach der Modulation schmalbandig gefiltert wird, so dass ein Seitenband fast vollständig unterdrückt wird (siehe **Bild 8**) und das Signal in ein 100 GHz-Kanalraster passt [13]. Mit diesem Verfahren konnten 80 Kanäle mit je 107 Gbit/s (8 Tbit/s) über 510 km mit ausreichendem Signal-Rauschabstand (Q-Faktor >11 dB) übertragen werden. Als spektrale Effizienz ergab sich 1 bit/s/Hz (vgl. Bild 9, gefülltes Quadrat) [15].

DQPSK-Modulation ermöglicht ein Kanalraster von 100 GHz. Auch die Kompatibilität mit rekonfigurierbaren optischen Add&Drop-Multiplexern (ROADM) konnte gezeigt werden: So wurden 2007 10 x 107 Gbit/s im NRZ-DQPSK-Format über 1200 km und 6 ROADMs mit einer

spektralen Effizienz von 1 bit/s/Hz übertragen [14]. Durch **Polarisationsmultiplex** kann Kompatibilität mit einem Kanalraster von 50 GHz erzielt werden. Ebenfalls in 2007 konnte die Übertragung von insgesamt 25.6 Tbit/s (160 Wellenlängenkanäle im C- und L-Band, jeder mit 2 x 85,4 Gbit/s DQPSK-Signalen) über 240 km demonstriert werden. Dieses System weist einen Rekordwert von 3,2 bit/s/Hz für die spektrale Effizienz auf (vgl. **Bild 9** unten) [16].

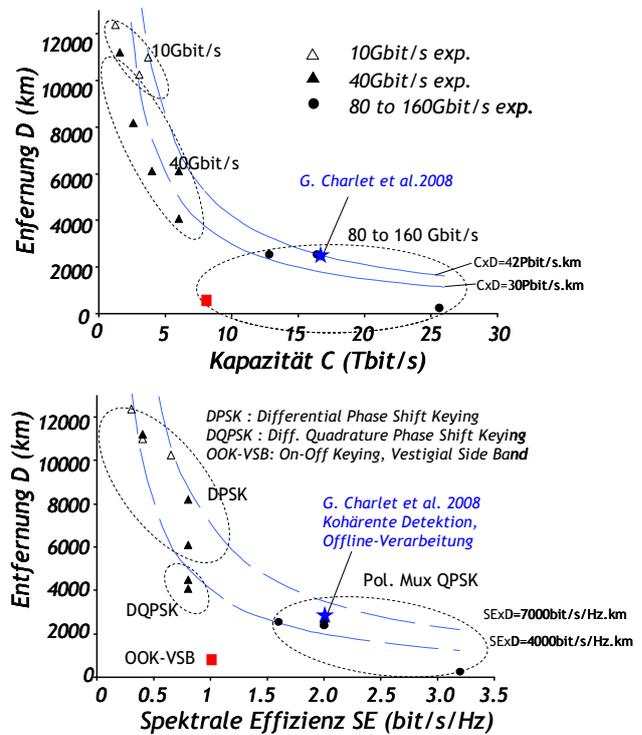


Bild 9 Auswahl einiger Übertragungsergebnisse (> 1Tbit/s) als Funktion der Kapazität (oben) und der spektralen Effizienz (unten), aus [17].

Durch Einsatz von **kohärenter Detektion** konnten Charlet et al. eine Streckenlänge von über 2550 km bei einer Gesamtdatenrate von 16,4 Tbit/s überbrücken, was einen Rekordwert von 41,8 Pbit/s·km beim Entfernungs-Kapazitäts-Produkt entspricht (siehe Bild 9 oben). Allerdings erfolgte die Signalverarbeitung der Empfangssignale nicht in Echtzeit, sondern off-line [17].

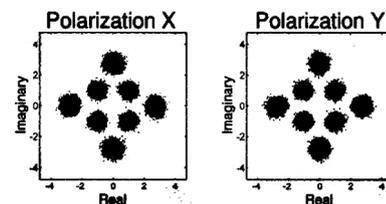


Bild 10 Konstellationsdiagramm (8-QAM) für Polarisations-Multiplex-OFDM-Übertragung [18].

Mit dem **Orthogonalen Frequenz-Multiplex-Verfahren**, Polarisations-Multiplex und off-line Verarbeitung konnte die Übertragung von 10 Wellenlängenkanälen mit je 121,9 Gbit/s (= 112 Gbit/s + Overhead) über 1000 km im

Kanalraster von 50 GHz gezeigt werden [18]. Es wurde eine nicht-rechteckförmige 8-QAM-Konstellation benutzt, um möglichst große Symbolabstände zu erzielen (siehe **Bild 10**). Die spektrale Effizienz betrug 2 bit/s/Hz.

3 Zusammenfassung

Um den weiter steigende Datenverkehr zuverlässig, sicher, energiesparend und zu vertretbaren Kosten bewältigen zu können, müssen Netzknoten und Transportsysteme mit Multi-Terabit/s-Kapazitäten entwickelt werden. Diese stellen allerhöchste Anforderungen an optische und elektronische Komponenten sowie an die Aufbautechnik für Module und Gesamtsysteme und erfordern neue, schichtenübergreifende Schalt- und Steuerungsfunktionen, die hohe Verfügbarkeit und Dienstqualität garantieren. Diese Punkte werden in der Innovationsallianz 100 Gbit/s Carrier Grade Ethernet Transport (100GET) gemeinsam von führenden Telekommunikationsausrüstern, Netzbetreibern, Komponentenherstellern, Forschungsinstituten und zahlreichen Universitäten aus Deutschland, Finnland, Frankreich und Schweden adressiert [19]. Weitere Fortschritte in Elektronik und Integrationstechnologien werden es erlauben, robuste und adaptive Modulationsverfahren, an denen heute in den Labors geforscht wird, in naher Zukunft zur Produktreife zu bringen.

4 Danksagung

Ein Teil der beschriebenen Arbeiten wurde vom BMBF (Projekte EIBONE und 100GET) und von der EU (Projekte TOPRATE und NOBEL) gefördert. Der Autor dankt allen Kollegen bei Alcatel-Lucent und bei den Partnern der oben genannten Projekte, die Material für diesen Vortrag beigesteuert haben.

5 Literatur

[1]: <http://de.wikipedia.org/wiki/AMS-IX>
 [2]: W. Froberg: „Parallelen: Entwicklung von IP-Datenverkehr und Mikroelektronik ähneln sich“ NET – Zeitschrift für Kommunikationsmanagement, 62. Jahrgang, 1 2/08, pp. 35-37, Januar 2008.
 [3]: W. Froberg: „Das Moore'sche Gesetz für IP-Verkehr“ 9. ITG-Fachtagung Photonische Netze, Leipzig, April 2008.
 [4]: Alcatel-Lucent signs new contract to build the Atlantic-Mediterranean segment of the Europe India Gateway submarine cable network; Alcatel-Lucent Press Release, 31.07.2008
 [5]: Combined ITU-T / IETF ad hoc group on T-MPLS; <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/ahtmpls.html>
 [6]: EIBONE Working Group Transmission Technologies: Whitepaper 100 Gbit/s Ethernet
 [7]: X.Liu et al., “Multichannel PMD mitigation through forward-error correction with distributed fast PMD

scrambling”, in Proc. of OFC 2004, paper WE2, 2004
 [8]: H. Bülow: “Outage vs PMD Tolerance Trade-Off for Fast Polarization Scrambling”, Proc. ECOC'06, paper Th2.5.2, 2006
 [9]: K. Schuh, E. Lach, B. Junginger: “100 Gbit/s ETDM transmission system based on electronic multiplexing transmitter and demultiplexing receiver”, in Proc. ECOC 2006, paper We3.P.124, 2006
 [10]: H.-G. Bach, A. Beling, G. G. Mekonnen, R. Kunkel, D. Schmidt, W. Ebert, A. Seeger, M. Stollberg, and W. Schlaak: “InP-Based Waveguide-Integrated Photodetector with 100 GHz Bandwidth,” IEEE J. Selected Topics Quantum Electron., vol. 1, 668–672, July/August 2004.
 [11]: J. H. Sinsky, A. Adamiecki, L. Buhl, G. Raybon, P. Winzer, O. Wohlgenuth, M. Duelk, R. Doerr, A. Umbach, H.-G. Bach, D. Schmidt: “107-Gbit/s Opto-Electronic Receiver with Hybrid Integrated Photodetector and Demultiplexer”, in Proc. OFC 2007, postdeadline paper PDP30, 2007
 [12]: M. Schmidt, E. Lach, K. Schuh, M. Schilling, P. Sillard, and G. Veith: “Unrepeated 320 Gbit/s (8x40 Gbit/s) OTDM transmission over 80 km TeraLight™-reverse TeraLight™ fiber link”, in Proc. ECOC 2003, paper We3.P.117, 2003
 [13]: K. Schuh, E. Lach, B. Junginger, G. Veith: “8x107 Gbit/s Serial Binary NRZ/VSF Transmission over 480 km SSMF”, in Proc. ECOC 2007, paper Mo 2.3.1, 2007
 [14]: P.J. Winzer, G. Raybon, S. Chandrasekhar, C.R. Doerr, T. Kawanishi, T. Sakamoto, K. Higuma: “10 x 107-Gb/s NRZ-DQPSK Transmission at 1.0 b/s/Hz over 12 x 100 km Including 6 Optical Routing Nodes”, in “, in Proc. OFC 2007, postdeadline paper PDP24, 2007
 [15]: K. Schuh, E. Lach, B. Junginger, G. Veith: “8 Tbit/s (80x107 Gbit/s) DWDM ASK-NRZ VSB transmission over 510 km NZDSF with 1bit/s/Hz spectral efficiency”, ECOC 2007, postdeadline paper 1.8, 2007
 [16]: A.H. Gnauck, G. Charlet, P. Tran, P.J. Winzer, C.R. Doerr, J.C. Centanni, E.C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, and K. Higuma: “25.6-Tb/s C+L-Band Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals”, OFC 2007, postdeadline paper PDP19, 2007
 [17]: G. Charlet, J. Renaudier, H. Mardoyan, P. Tran, O. Bertran Pardo, F. Verluise, M. Achouche, A. Boutin, F. Blache, J.-Y. Dupuy, S. Bigo: “Transmission of 16.4Tbit/s Capacity over 2,550km using PDM QPSK Modulation Format and Coherent Receiver”, OFC/NFOEC 2008, postdeadline paper PDP3, 2008.
 [18]: S.L. Jansen, I. Morita, H. Tanaka: “10x121.9-Gb/s PDM-OFDM Transmission with 2-b/s/Hz Spectral Efficiency over 1,000 km of SSMF”, OFC/NFOEC 2008, postdeadline paper PDP2, 2008
 [19]: BMBF-Pressemitteilung vom 11.12.2007 und <http://www.celtic-initiative.org/Projects/100GET/>